



深中通道西人工岛总体设计及 大直径钢圆筒快速成岛技术*

刘 健¹, 夏丰勇¹, 唐一夫²

(1. 深中通道管理中心, 广东 中山 528400; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 深圳至中山跨江通道工程是我国继港珠澳大桥之后又一个集桥、岛、隧、水下互通立交为一体的跨海交通集群工程。肩负着桥隧转换的重要使命, 深中通道西人工岛能否快速、安全成岛是整个工程非常关键的一环。西人工岛功能定位高、施工工期短, 在设计及施工上均有一定难度。针对西人工岛总体设计及快速成岛技术进行论证, 主要包括人工岛位置、岛型、平面布置、岛壁结构钢圆筒直径、DSM辅助振沉工艺等内容, 可为深海大型人工岛建设提供经验。

关键词: 深中通道; 人工岛; 设计方案; 快速成岛技术; DSM法

中图分类号: U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0013-07

Overall design of western artificial island of Shenzhen-Zhongshan link and rapid island-formation technology by large-diameter steel cylinder

LIU Jian¹, XIA Feng-yong¹, TANG Yi-fu²

(1. Administration of Shenzhen-Zhongshan Passage, Zhongshan 528400, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Shenzhen-Zhongshan River-crossing Link is another cross-sea traffic project in China integrating bridges, islands, tunnels, and underwater interchange after the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. With the important mission of bridge-tunnel conversion, whether the west artificial island can be quickly and safely formed is a key part of the whole project. The west artificial island has high functional requirements, a short build period, and certain difficulties in design and construction. This paper demonstrates the overall design of the west artificial island and rapid island-formation technology, which mainly includes the location, shape, and plane layout of the island, the diameter of the steel cylinder of the island wall structure and the DSM assisted vibration sinking construction, which can provide experience for the construction of large artificial islands in the deep sea.

Keywords: Shenzhen-Zhongshan link; artificial island; design scheme; rapid island-formation technology; deep slurry mixing method

1 深中通道概述

近年来, 人类生产、生活不断向海洋深入, 越来越多的跨江海工程随之涌现, 而桥梁方案往往是首选。但随着对环境、通航、通行保障等的要求日趋严格以及水底隧道设计、施工技术的不断进步, 跨江海隧道方案的优势逐渐体现^[1]。

深圳至中山跨江通道(简称“深中通道”)地处珠江下游核心区域(图1), 位于虎门大桥下游约30 km, 距离港珠澳大桥上游约40 km, 直接连接深圳、中山市和广州南沙。项目东接机荷高速, 西至中山马鞍岛, 与规划的中开、东部外环高速对接, 项目全长约24 km, 其中跨海段长约

收稿日期: 2020-08-29

*基金项目: 广东省科技计划项目(2017B020221003)

作者简介: 刘健(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 从事科研、设计、项目建设管理工作。

22.4 km。是世界上首例集超宽超长海底隧道、超大跨海中桥梁、深水人工岛、水下互通“四位”一体的集群工程，其建设标准、工程规模、建设难度、工程复杂程度均为现今世界类似工程之最。



图 1 深中通道位置

深中通道采用东隧西桥方案，包括东、西2个人工岛，其中西人工岛作为主跨1 666 m的海上大桥和双向八车道海下超宽沉管隧道之间的过渡转换，是项目的重要组成部分。西人工岛位于砾石水道西侧，岛长625 m，最宽处456 m，基本功能是实现海上桥梁和隧道的顺利转换，满足岛上建筑物布置需要，并提供基本掩护功能，保障主体建筑物的顺利建设和正常运营^[2]。本文立足于深中通道工程特点，总结和阐述西人工岛的总体设计方案，并从钢圆筒的设计、振沉等方面论述钢圆筒快速成岛技术。

2 西人工岛总体设计

2.1 人工岛位置和长度的确定

珠江口内水域为重要的防洪通道，按照珠江口防洪规划，人工岛等大型阻水设施应尽可能设置在珠江治导线内，伶仃洋东西侧治导线之间最多设置一处人工岛，因此东人工岛设置在大铲航道以东的治导线内，西人工岛位于砾石水道与伶仃水道之间。深中通道工程位于珠江口东四口门出海口的河口湾，是保障珠江河口泄洪安全、维持河口潮汐动力的关键断面，必须控制工程阻水面积，优化流态，控制河床河势稳定。根据相关防洪研究成果^[3]及水利部门要求，西人工岛轴线

长度不能超过625 m。针对工程整体的相关数值分析^[4]也说明，在将岛长控制在625 m的情况下，深中通道的实施，对近岛、桥局部区域潮位及流场的改变比较明显，对伶仃洋滩槽总体格局影响不大。

2.2 人工岛岛型比选

西人工岛位于珠江口中心位置，与伶仃洋大桥共同组成了深中通道的标志性建筑，因此人工岛形状除了满足岛上功能布置与施工要求外，还要满足粤港澳大湾区景观性和标志性的要求。

2.2.1 岛型方案 1：风筝形状

方案1中西人工岛采用风筝形状(图2)，与桥梁浑然一体，线条简洁明快，凸显三角元素，力度感强，建筑与岛型完美结合，标志性突出。岛上建筑包含监控中心、展览中心、会议中心等设施。所有的设备均在地面一层或以下，便于运营维修工作，降低成本。



图 2 岛型方案 1

本方案人工岛轴线长度625 m，横向最宽处约456 m，形成陆域面积13.70万m²，用海面积约25.6万m²，岛壁结构总长约1 622 m，陆域高程4.9 m。

2.2.2 岛型方案 2：心系伶仃

方案2采用“心系伶仃”的景观设计主题，采用“画心成岛，涟漪成池”的独特“叠水托心”造型，营造“岛在海上、海在岛中”的奇妙效果，而隧道出口处的水下透明天窗和宝石形遮光穹顶进一步强化了景观的独特性。

本方案人工岛呈水滴形(图3)，长625 m，横向最宽处320 m，岛上核心区域可利用的面积为

5.27万m², 岛体面积14.55万m², 用海面积为24.17万m²。设3层消浪平台, 陆域高程分别为3.3、4.1、4.9 m; 不同位置设4座挡浪墙, 顶高程分别为3.6、4.4、5.2和6.0 m; 既可满足岛内核心区域观光要求, 又可通过多个台阶降低挡浪墙顶高程和越浪量。

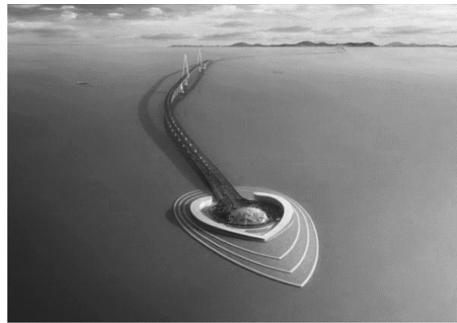


图3 岛型方案2

2.2.3 推荐方案

综合考虑功能布置需求、水利防洪、运营维护、施工场地以及整体景观效果, 采用岛型方案1即风筝形状方案。

2.3 平面布置

2.3.1 功能定位

为实现人工岛基本功能, 要求在施工期间人工岛能为岛上隧道、道路、桥台、风塔等构筑物的施工创造相对良好的施工条件, 在运营期人工岛在保证自身的稳定和耐久的同时, 还可控制人工岛地基的沉降和变形, 为隧道、风塔等岛上构筑物提供必要的保护, 具备防浪、防冲、防船撞的使用功能, 避免由海上波浪、潮流和船舶撞击等因素对岛上隧道和其他构筑物造成直接破坏(图4)。

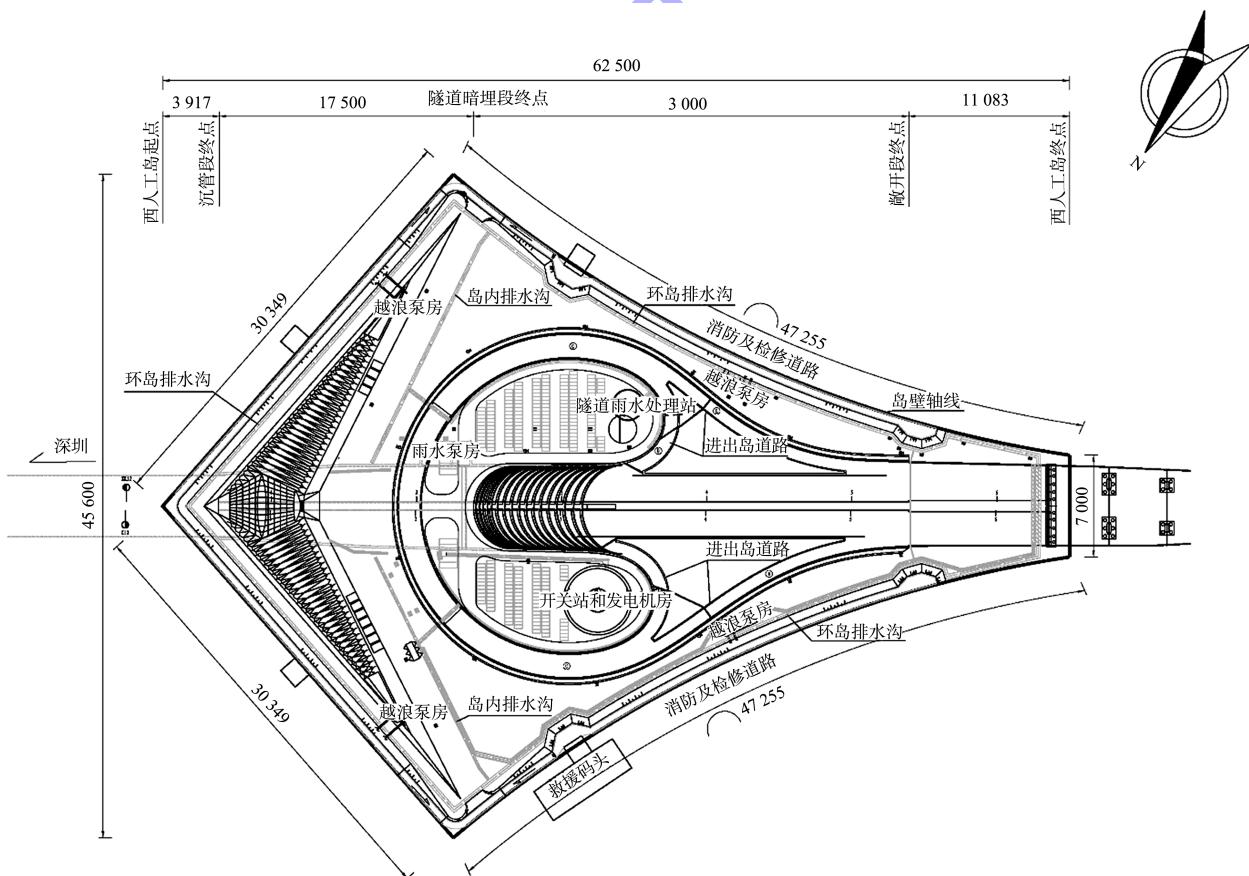


图4 西人工岛总平面布置(单位: cm)

2.3.2 岛上建筑

根据西人工岛功能定位, 在西人工岛设置隧

道管理站、救援站、通信站等必要的运营管理设施, 以及路政、交警和消防执勤点等。岛上建构

筑主要包括主体建筑、风塔、直升机停机坪，办公楼、宿舍等管理用房以及各类配套功能用房，包括风机房、雨水泵房、越浪泵房、消防泵房、供水泵房、污水处理站、变电站、发电机房、停车场等。并在东北侧设救援码头 1 座，码头长 65 m、宽 24 m，可停靠 200 t 救援艇船。

2.3.3 道路

2.3.3.1 进出岛道路

根据使用功能需求，西人工岛设置主线进出岛道路，主要服务于管养、救援车辆通行，考虑有限的对外服务功能，因此西人工岛承担的转换交通量较小。

根据岛面建筑布局限制，考虑到岛上交通组成主要为管养车辆及通勤车，其对路况熟悉的特点，岛上匝道设计速度为 30 km/h，匝道最小圆曲线半径为 30 m，最大纵坡按 4% 控制。考虑到主线与匝道运行速度差较大，为改善行车视距，对变速车道标准长度提高 15% 以上，减速车道长 147.6 m，加速车道长 232.4 m。

按照上述各控制因素，并结合建筑景观需要，将进出岛道路布局成脸谱(琵琶)造型，流入流出人工岛的 4 条匝道均采用单向单车道，控制变速车道起终点不进入沉管隧道段，充分利用岛上空间，布置了对称苜蓿叶方案，对匝道结构进行适当加宽，以满足 40 km/h 行车速度时停车视距的需要。

2.3.3.2 岛上道路

根据 SL 435—2008《海堤工程设计规范》^[5] 挡浪墙内侧道路高程要求，结合岛内消防和巡视要求，挡浪墙内侧设 5.0 m 宽环岛路，环岛路高程为 7.8 m；环岛路设 5% 纵坡与岛上道路衔接。考虑到环岛路受外海越浪海水影响较大，采用混凝土路面。

2.4 防潮防浪

2.4.1 设计允许越浪量标准

综合考虑人工岛挡浪墙后环岛路车辆和行人的安全、隧道防淹以及岛内排水能力等要求，确定人工岛允许越浪标准。

1) 正常通行工况：重现期 10 a 的高水位和重现期 10 a 的波浪要素组合条件下，越浪量 $\leq 3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ；

2) 设计工况：重现期 100 a 的高水位和重现期 100 a 的波浪要素组合条件下，越浪量 $\leq 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ；

3) 极端工况：重现期 300 a 的高水位和重现期 300 a 的波浪要素的组合条件下，越浪量 $\leq 0.015 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

2.4.2 高程设计

2.4.2.1 岛内地面高程

人工岛四周设有挡浪墙，岛内地面设计高程须综合考虑岛岸连接、桥隧转换方便、人工岛的经济与安全性。人工岛陆域高程应满足在设定的防护标准水位时陆域不被淹没，并应根据场地功能、水文气象条件、排水方式等要求，结合岛壁结构、地形、地质和其他外部条件等因素综合考虑确定。

本工程人工岛极端高水位的重现期为 300 a，考虑该工程的重要性，采用重现期 1 000 a 的潮位进行复核，并考虑海平面的上升趋势以及工后沉降因素，人工岛的高程经计算取 4.9 m(85 国家高程起算)。

2.4.2.2 挡浪墙顶高程

根据物理模型试验结果^[6-7]，人工岛岛壁结构设计断面在重现期 10、100、300 a 波浪作用下，堤顶高程设置在 8.8 m 能够满足设计允许越浪量的要求；但考虑海平面上升即水位增加 0.5 m 时，顶高程则需要加高至 9.0 m，能够满足要求。

结合试验结果^[8]，挡浪墙结构 2.0 m 以上设置为阶梯状，以满足人工岛岛型和景观的要求，凸显人工岛的三角元素和力度感，2.0 m 以下设置为扭王字块体护面以进行消能。

2.5 排水系统

2.5.1 越浪海水

西人工岛面积较小，场地平坦，为防止大浪期间淹没岛屿，设计中采取“以防为主，以排为辅”的原则。本工程防护标准为满足重现期 300 a

的高潮位和重现期300 a的波浪要素的组合条件下的越浪量排水要求。

在全岛设置4座越浪泵房,分别位于东、西、南、北侧,越浪泵房设置在挡浪墙内侧,岛面高程为4.9 m。沿人工岛设置环岛排水明沟,用于截流排放越浪和收集排放雨水,并作为4座越浪排水泵房的过水通道。环岛排水沟净宽2.0 m,净深约为1.8 m。采用重力流和压力流结合的排水方式。

1)重力流排水工况:设计工况满足重现期100 a高水位和重现期100 a波浪要素组合条件下排水要求。此设计工况下岛内四面总越浪量为 $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2)压力流排水工况:极端工况满足重现期300 a高潮位和重现期300 a波浪要素组合条件下排水要求。此设计工况下岛内四面总越浪量为 $8.84 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.5.2 岛面雨水

岛面雨水通过岛面散坡汇入邻近排水沟。屋面雨水经雨水斗和雨水管排放至建筑物外围排水明沟,其余区域地面雨水沿地形散排至各分区排水明沟。

2.5.3 隧道雨水

主线隧道和各匝道降雨排水系统设单独的雨水泵房。其中主线隧道雨水通过雨水泵房接入雨水回用系统,经过处理后回用于室外绿化用水。匝道雨水通过雨水泵房接入附近环岛排水沟。

3 钢圆筒快速成岛技术

大直径圆筒结构具有施工快、工序简单的特点,在人工岛围护方面有很大的优势。薄壁钢圆筒结构施工过程中,较易穿过淤泥层及淤泥质黏土层。在砂土层中振沉施工,砂土会发生液化变形,使得土体趋于密实,导致圆筒结构下沉困难^[9],因而要采取相应的措施。

3.1 建设条件

深中通道西人工岛围护结构为57个钢圆筒,直径28 m,单筒质量584~653 t,筒底面高程-36.0~-31.5 m,钢圆筒打设精度要求为平面偏差≤350 mm,垂直度≤1%,锁口平面偏位(扭角)

≤2°,筒底2/3位置位于持力层上,持力层包括砂层、圆砾、花岗岩等地层。

由表1可知,不同于已实施的工程,深中通道工程场区内地基持力层为不均匀风化岩层,上方软弱土层较厚且局部夹坚硬砂层,对于钢圆筒结构的设计稳定性和打设施工都提出了较大的挑战。

表1 人工岛及基层地质情况对比

工程名称	人工岛面积/万m ²	地质情况
港珠澳大桥	10.0	厚软基
深中通道	13.7	淤泥夹砂,岩基

3.2 钢圆筒直径的选择

采用日本规范^[10]对钢圆筒稳定性进行计算,以圆筒顶部位移作为钢圆筒稳定性指标,分析其与钢圆筒直径、筒底土层情况、筒底表层淤泥换填深度的关系,结果见图5。

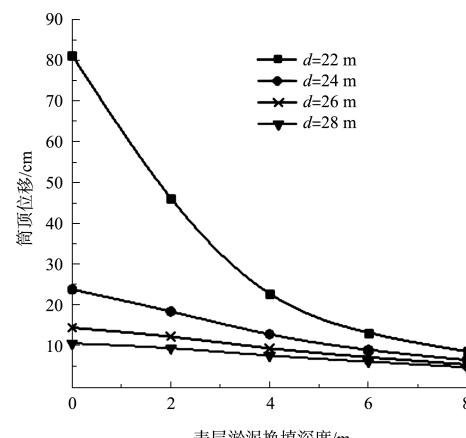
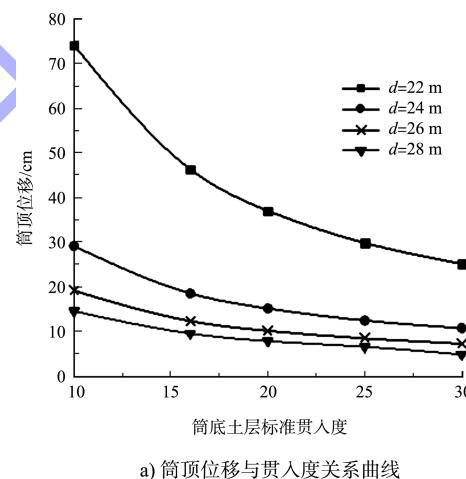


图5 筒顶位移与筒径d、筒底土层标贯、表层淤泥换填深度的关系

从图 5 可知：

- 1) 筒径增加至 26 m 后，顶部位移趋于稳定；
- 2) 筒径越大对于筒底持力层强度的依赖性就越小，这提高了圆筒对于本地区不均匀地质条件的适应性；
- 3) 筒径越大对于换填深度的依赖性就越小，这对于副格刚度较差、难以打入较厚砂层的情况是有利的。

经计算得知，随着筒径的增大，筒壁厚度须增加，但钢圆筒个数减少。综合来看，筒径增加，岛壁结构的造价并未发生较大变化，但钢圆筒数量的减少能够缩短工期。因此，在不大量增加造价的前提下，采用 28 m 的钢圆筒直径对于保证钢圆筒结构稳定性是必要的。

3.3 钢圆筒的打设

1) 设计阶段采用整体有限元模型对基坑周边钢圆筒进行逐个稳定性和位移分析，结合 BIM 技术对钢圆筒持力层的不均匀性进行分析，确保钢圆筒结构安全可靠。

2) 针对 28 m 直径钢圆筒，在已有的“八锤联动锤组”技术基础上，选用 12 台进口 APE600 型液压振动锤组成“十二锤联动锤组”新技术，集震力更大，更有利于振沉。

3) 针对钢圆筒持力层变化大及上部夹杂硬砂层的地质情况，在钢圆筒振沉前采用 DSM 法 (deep slurry mixing 深层泥浆搅拌) 对砂土层和部分不平坦的风化岩持力层进行预处理，既使钢圆筒容易打入，又不会导致结构失稳。

DSM 法硬土层辅助贯入施工技术是采用专业性船舶对水下硬土层地质进行处理的施工技术^[11]，主要方法为：使用处理机钻头搅拌硬土层使其松散，同时喷射膨润土浆体进行地质改良，以提供良好的钢圆筒振沉地质条件。本工程对砂层、圆砾层以及岩层进行机械贯入扰动处理，最终达到软化土层且穿透硬土层的目的，从而满足钢圆筒振沉和垂直接要求。

4) 鉴于 DSM 技术为国内首次使用，选取部分圆筒进行典型振沉施工，取得很好的效果，并确

定了 DSM 的处理标准^[12]，对需要处理的砂层厚度及砂层标贯击数都有明确的规定。

5) 通过钢圆筒振沉测量系统与起重船操作相结合，高精度振沉钢圆筒，平面偏差、垂直度及高程均可满足设计要求，能确保钢圆筒振沉穿透硬砂层，同时筒底 2/3 周长嵌入持力层。

3.4 技术特点

利用插入式钢圆筒结构的良好稳定性和止水性，构筑安全、可靠的隧道基坑施工期止水围护结构，在实现快速整岛止水的同时，避免了传统基坑围护结构的内部支撑结构，扩大岛上隧道施工的作业面，快速形成隧道施工的海上稳固基地，同时为岛内软基处理创造了有利条件。

采用 28 m 直径钢圆筒作为人工岛围护结构，具有施工精度高、工效快、利于环保及装配化能力强等特点，避免进行水下大量开挖，减少海洋污染，与自然环境和谐相处。

4 结语

1) 深中通道项目建设规模大、建设条件复杂、综合技术难度高，是我国继港珠澳大桥之后难度更大的又一项重大跨海交通工程。西人工岛作为桥隧转换的重要部分，设计、施工方案均需要全面系统研究。

2) 设计方案紧密围绕西人工岛的功能定位，结合防洪、美观、防护等要求，在岛型选择、总平面布置、防潮防浪、排水系统、结构设计等方面都进行了充分的论证。

3) 西人工岛所处位置地质复杂、航道繁多、台风频发，西人工岛围护结构采用直径 28 m 钢圆筒，提出 DSM 法辅助振沉施工，为岛上提供了安全、可靠、稳定的干施工环境，具有快速、高效、安全、环保等诸多优势，同时增强了成岛稳定性，也能够减少施工对海洋生态环境的影响。

4) 西人工岛开工建设后 4 个月便成岛形成陆域，为后续工程施工提供了良好的场地条件。工程整体进展顺利，后续监测、检测结果满足设计要求。

参考文献:

- [1] 徐国平,黄清飞.深圳至中山跨江通道工程总体设计[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):627-637.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司.深圳至中山跨江通道初步设计[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2017.
- [3] 徐峰俊,张心凤,杨莉玲.深中通道工程防洪评价研究报告[R].广州:珠江水利科学研究院,2017.
- [4] 杨莉玲,李越,徐峰俊,等.深中通道工程对伶仃洋水流环境的影响[J].水运工程,2018(5):23-29.
- [5] 水利部水利水电规划设计总院.海堤工程设计规范:GB/T 51015—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [6] 交通运输部天津水运工程科学研究所.深圳至中山跨江通道项目西人工岛整体物理模型试验报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2016.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所.深圳至中山跨江通道项目人工岛结构断面物理模型试验报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2016.

(上接第12页)

2)装配重力式混凝土护岸结构主要可拆分为L型挡墙、立板、底板、混凝土方块、空箱块体等构件形式,主要根据运输条件、吊装能力等因素确定。

3)装配式预制挡墙护岸结构的连接采用湿法连接和干法连接,主要包括立板与底板之间的垂直连接和构件水平连接。其中,垂直连接可采用套筒灌浆连接、浆锚搭接及垂直湿法现浇连接等方式;水平连接可采用凹凸榫槽连接、螺栓连接、套筒灌浆连接、浆锚搭接、焊接连接及水平向湿法现浇连接。

4)装配重力式混凝土护岸结构涉及到组合模具、运输吊装、垫层座浆施工等关键施工技术方法,可为同类工程提供技术指导。

5)通过实施案例,反映出该套技术具有可操作性和先进性,能较好实现生态、环保建造的产业升级,行业应用前景广泛。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护

津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2016.

- [8] 戈龙仔,蔡翠苏,胡鹏,等.深中通道西人工岛岛形对护面块体稳定性和堤顶越浪的影响[J].水运工程,2020(7):1-6.
- [9] 徐艇.大直径薄壁圆筒结构振动下沉过程瞬态动力有限元分析[D].天津:天津大学,2007.
- [10] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.
- [11] 安秀山,冯宝强.DSM法硬土层辅助贯入施工技术的研发与应用[J].中国港湾建设,2020(5):16-19,54.
- [12] 夏丰勇,刘汉勇,刘健.深中通道西人工岛钢圆筒振沉典型施工[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(5):238-240.

(本文编辑 郭雪珍)

岸设计规范:JTJ 154—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

- [2] 史玉芳,康坤,王秀芬.基于SWOT分析的我国装配式建筑发展对策研究[J].建筑经济,2016,37(11):5-9.
- [3] 中华人民共和国国务院.国务院公报《“十三五”国家科技创新规划》[R].北京:国务院,2016.
- [4] 中华人民共和国国务院.《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020年)[R].北京:国务院,2006.
- [5] 江义,程泽坤,吴志良,等.装配式桩基码头设计建造应用现状与展望[J].水运工程,2018(6):103-109.
- [6] 朱红亮,沈旭鸿.工业化装配式技术在内河航道重力式护岸中的应用[J].中国水运(下半月),2016,16(4):252-253,257.
- [7] 顾宽海,刘术俭.适用于软土地基的呼吸型重力式预制箱体生态驳岸结构:中国,ZL201821861434.0[P].2019-09-13.
- [8] 顾宽海,陈浩群,张逸帆,等.装配式低桩承台护岸结构设计[J].水运工程,2018(12):186-192.
- [9] 郭学明.装配式混凝土结构建筑[M].北京:机械工业出版社,2019.

(本文编辑 武亚庆)